SCIENCE DU SOL 1988 - Vol. 26/2 - pp. 103-112 - PLAISIR-FRANCE

APPRECIATION DE LA MOBILITE ET DE LA BIODISPONIBILITE DES ELEMENTS EN TRACES DU SOL

C. JUSTE [1]

RESUME

Après avoir établi une distinction entre concepts de mobilité et de biodisponibilité d'une part et ceux de flux et de réserves d'éléments en traces du sol d'autre part, on a analysé les raisons du choix des réactifs chimiques permettant la prédiction de leur mobilité strictement physico-chimique. Bien que le végétal soit le meilleur révélateur de la biodisponibilité, la plupart des artifices actuellement utilisés pour apprécier cette dernière mettent en fait en jeu des réactifs chimiques d'évaluation de la mobilité. Leur choix repose surtout sur la réalisation d'un compromis entre l'extraction d'une quantité minimale de l'élément permettant son dosage de manière fiable et celle d'une quantité maximale, la plus proche possible de la quantité effectivement prélevée par le végétal. Les limites de validité de l'assimilation du concept de mobilité à celui de biodisponibilité sont tracées.

L'appréciation de la biodisponibilité des éléments du sol qui exercent une influence sur le comportement des végétaux cultivés a toujours représenté l'un des soucis majeurs des agronomes. Cette prévision est en effet indispensable pour corriger, le cas échéant, cette composante essentielle de la fertilité du sol avant la mise en place de la culture.

I. MOBILITE ET BIODISPONIBILITE D'UN ELEMENT

En se gardant bien de faire l'exégèse de tout ce qui a été écrit ou dit au sujet de la biodisponibilité, de l'assimilabilité, etc., on distinguera le concept de mobilité de celui de biodisponibilité (fig. 1).

La mobilité d'un élément suceptible d'intervenir dans le fonctionnement ou la qualité de la plante est l'aptitude de cet élément à passer dans les compartiments du sol où il est de moins en moins énergiquement retenu, le compartiment ultime étant représenté par la phase liquide ou, dans certains cas, l'atmosphère du sol.

Mots-clés : Eléments en traces - Mobilité - Biodisponibilité - Transfert - Réactifs d'extraction.

(1) Station d'Agronomie, INRA - Centre de recherches de Bordeaux - 33140 Pont de la Maye.

Association Française pour l'Etude du Sol - www.afes.fr - 2010

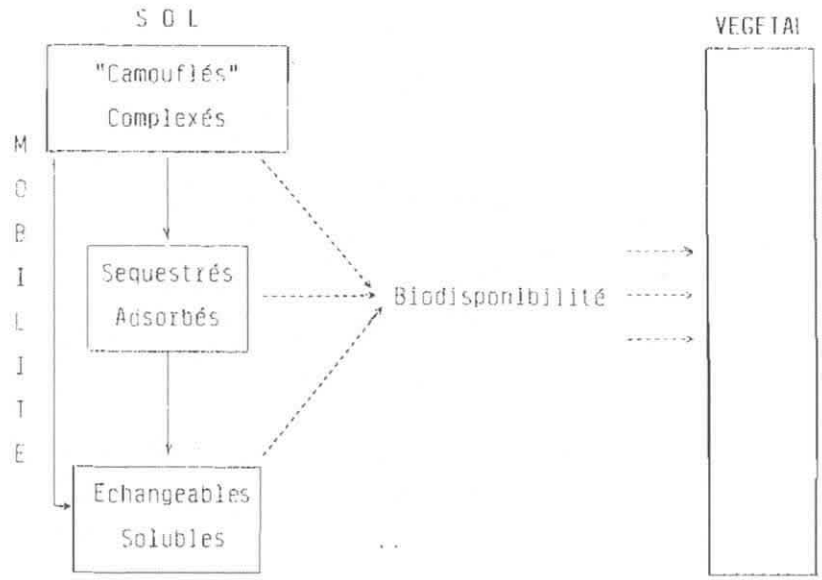

Figure1 : Mobilité et biodisponibilité des éléments en traces du sol.
Trace element mobility and bioavailability in soil.

La biodisponibilité d'un élément est son aptitude à être transféré d'un compartiment quelconque du sol vers un organisme vivant dans ce dernier (racine d'une plante, micro-organisme, mésofaune...).

Le passage effectif d'un élément d'un compartiment du sol à un autre ou d'un compartiment du sol dans un organisme vivant est assimililable à un *flux* dont on cherche à prédire l'intensité par une série d'artifices ; « a priori », ceux-ci devraient être différents s'il s'agit de caractériser la mobilité ou la biodisponibilité potentielles telles qu'elles viennent d'être définies.

En fait, s'agissant de plantes dont les systèmes racinaires puisent préférentiellement dans la solution du sol, les techniques d'estimation de la mobilité potentielle peuvent, dans la majorité des cas, rendre également compte de la biodisponibilité.

Cas particulier des éléments en traces

Les éléments en traces sont ceux que l'on trouve habituellement dans les végétaux à des concentrations inférieures à 100 mg/kg de matière sèche (TROCME, 1970). Il s'agit la plupart du temps d'éléments métalliques indispensables à faible concentration au déroulement des processus biologiques (oligo-éléments), mais aussi de métaux non indispensables qui peuvent, d'ailleurs comme les oligo-éléments, devenir très rapidement phytotoxiques ou compromettre la qualité de la chaîne alimentaire dès que leur biodisponibilité devient trop importante.

L'attention portée ces dernières années au problème de la pollution métallique des sols explique l'effort de recherche notable consenti pour une meilleure appréciation du risque encouru par suite de l'accumulation de ces polluants très rémanents, notamment au niveau de l'étude de leur biodisponibilité.

Les concepts de mobilité et de biodisponibilité qui s'appliquent aux éléments majeurs et aux méso-éléments sont également valables pour les éléments en traces, mais, pour ces derniers, la prédiction de la biodisponibilité pose une certain nombre de problèmes spécifiques (JUSTE, 1983) liés :

— au grand nombre d'espèces chimiques regroupées sous le vocable « éléments en traces », indispensables ou non, mais susceptibles d'être absorbés (une vingtaine selon NIEBOER et RICHARDSON, 1980), qui conduit à une large gamme de comportements dans les sols ou à l'interface sol-végétal ;

Association Française pour l'Etude du Sol - www.afes.fr - 2010

— à la multiplicité des phases de rétention (figure 2) susceptible de fixer un même élément, l'activité dans la solution du sol étant toujours très faible (10^{-4} à 10^{-8} M) ;

— à l'importance des interactions (entre éléments en traces entre eux ou entre ces derniers et les éléments majeurs) qui interviennent au cours des transferts ;

— aux faibles quantités d'éléments prélevées par une culture.

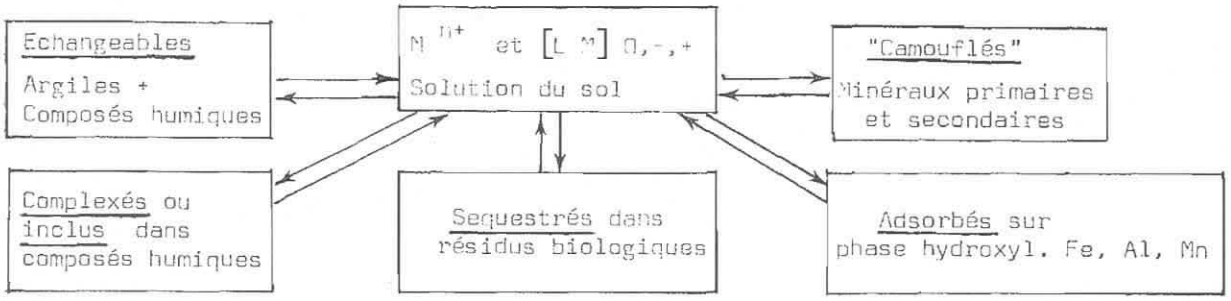

Figure 2 : Etat des métaux dans les sols (B. GUILLET et al., 1980).
Metal speciation in soils.

II. PREDICTION DE LA MOBILITE

Elle consiste en fait à évaluer un stock, exprimé en concentration de l'élément par rapport à une masse de sol, en utilisant des *réactifs d'extraction chimiques* dont certains mobilisent préférentiellement les élémens présents dans des compartiments assez bien définis comme la solution du sol (réactif d'extraction constitué par de *l'eau)* ou les compartiments d'échange (réactif d'extraction constitué par une *solution saline neutre).*

Dans les sols non pollués, le bore est le seul parmi les éléments en traces qui peut être solubilisé par l'eau bouillante en quantité suffisante pour permettre un dosage de routine ; la plupart des éléments en traces réellement solubilisés par l'eau (filtrables au travers d'une membrane à pores de 0,45 μ) ou échangés par une solution saline le sont à des concentrations assez faibles qui exigent des techniques de dosage sophistiquées comme l'absorption atomique sans flamme ou la polarographie par redissolution anodique (GRAMBELL *et al.,* 1982) peu compatibles avec l'analyse de grandes séries.

En dehors de l'eau ou des solutions salines neutres qui s'adressent à la fraction des éléments contenue dans des compartiments un peu mieux définis, le choix de la plupart des réactifs utilisés, notamment pour l'extraction des éléments en traces (tableau I), tient « a priori » assez peu compte des compartiments du sol supposés être préférentiellement affectés par l'extraction. On cherche plutôt à réaliser un compromis entre la mobilisation d'une quantité minimale de l'élément permettant son dosage dans les meilleures conditions de rapidité et de fiabilité et la quantité maximale qui peut être mise en relation avec la réponse du végétal à l'élément considéré.

Cette démarche intuitive explique l'existence d'un grand nombre de *réactifs de caractère acide très variés,* les protons intervenant à la fois dans les phénomènes d'échanges, la solubilisation de composés chimiques définis ou la destruction partielle à totale des compartiments contenant l'élément à doser qui se trouve ainsi libéré.

Les progrès réalisés dans la chimie de la coordination ont permis, au cours des deux dernières décennies, de mettre à la disposition des agronomes des *réactifs d'extraction complexants* (EDTA, DTPA, EDDHA...) dont l'emploi tend à se généraliser. Certains réactifs à base d'acides organiques utilisés depuis fort longtemps avec un certain succès (citrique, oxalique, lactique...) le doivent d'ailleurs très vraisemblablement au caractère complexant de leur radical organique.

Tableau I : Quelques réactifs d'extraction des éléments en traces du sol.

Some chemical extracting solutions used to predict trace element mobility in soils.

Réactif	Forme supposée concernée
— Eau	Soluble
— Chlorure de calcium	Echangeable
— Chlorure de baryum	»
— Nitrate de sodium	»
— Nitrate de potassium	»
— Acide oxalique dilué } différents pH	Carbonates oxydes
— Acide acétique dilué } différents pH	» »
— Hydroxylamine	Formes oxydées
— Eau oxygénée	Matière organique
— Agents chélatants (EDTA)	Matière organique
(DTPA	Oxydes
(EDDHA)	
— Acide chlorhydrique	Fortement liée ou totale
— Acide nitrique	» » »
— Acide nitrique + acide chlorhydrique	» » »
(eau régale ou aqua regia)	» » »
— Acide fluorhydrique	» » »

Les éléments dont la mobilité est fortement dépendante de leur état d'oxydation (fer et manganèse notamment) conduisent à utiliser des réactifs d'extraction qui agissent en modifiant profondément le *potentiel d'oxydo-réduction du sol* (hydroxylamine, acide ascorbique....) ; en fait, ces réactifs agissent en solubilisant par réduction soit l'élément à doser, soit plus généralement les oxydes métalliques de fer et de manganèse qui constituent dans la plupart des sols un compartiment important de rétention des éléments en traces métalliques.

Il convient de rappeler que toutes les techniques de prédiction de la mobilité des éléments qui mettent en œuvre un seul réactif d'extraction sont très conventionnelles, car elles substituent à la notion de flux celle de stock évalué par ce réactif ; elles permettent donc simplement de présumer des différences de mobilité d'un élément selon le type de sol qui le contient ou encore des différences de mobilité qui existent entre les divers éléments présents dans un même échantillon de sol.

La technique qui consiste à repérer la localisation d'un élément parmi les différents compartiments du sol est plus satisfaisante sur le plan conceptuel dans la mesure où la connaissance de cette localisation permet de prévoir la probabilité de transfert de l'élément vers les compartiments de moindre énergie de rétention. Les méthodes d'*extraction séquentielle*, faisant agir successivement sur un même échantillon toute une série de réactifs, sont actuellement appliquées avec plus ou moins de succès pour tenter précisément d'identifier les principales phases de rétention des éléments en traces dans les sols ou les sédiments (MEGUELLATTI, 1982).

Plus récemment, un certain nombre de logiciels (Goechem entre autres), qui permettent la prévision de la répartition des espèces métalliques complexées ou non dans la phase liquide du sol, ont été mis au point (SPOSITO et BINGHAM, 1981) ; un programme de cette nature mettant en jeu 36 cations et 69 ligands est actuellement accessible sur Multics via le réseau Transpac (LAMY, 1986). Cette méthode constitue un progrès intéressant puisqu'elle permet dans une certaine mesure d'avoir *par le calcul* une simulation de la répartition d'un élément entre divers ligands du sol et donc une prévision de sa mobilité potentielle (tableau II).

Association Française pour l'Etude du Sol - www.afes.fr - 2010

Tableau II : Distribution des métaux dans le sol (% du total). Calcul Geochem (LUND et al., 1985).
Metal speciation in soil (as % of total amount).

	Non lié	CO_3	SO_4	PO_4	NO_3	Cl	Organ.
Fe	—	20,6	—	—	—	—	79,3
Mn	77,8	11,9	6,1	1,4	1,4	0,2	2,2
Cu	0,3	0,1	—	—	—	—	99,2
Zn	69,9	18,5	6,9	0,7	—	0,1	3,7
Cd	62,2	1,7	4,9	0,5	1,1	17,2	12,4
Ca	88,6	0,6	6,9	0,3	0,6	1,0	0,2
K	99,0	—	0,6	—	0,3	—	—

Une autre approche de l'estimation de la mobilité potentielle des éléments en traces du sol a été tentée par des chercheurs de l'Université de Gand (DHAESE et COTTENIE 1979) grâce au suivi de la solubilisation progressive des métaux dans des suspensions de terre soumises à une acidification croissante.

III. PREDICTION DE LA BIODISPONIBILITE

La plante est le meilleur révélateur de la biodisponibilité réelle d'un élément (tableau III), car elle intègre l'effet de tous les facteurs qui la déterminent.

Le *diagnostic végétal* a été utilisé de longue date, et plus particulièrement dans le cas des métaux en traces, comme critère d'appréciation de la biodisponibilité grâce à la définition de seuils de carences ou de toxicité.

Le principal reproche que l'on peut faire à cette méthode est son absence de valeur prédictive satisfaisante à court terme ; la mise au point d'une méthode biologique de prédiction de la biodisponibilité des éléments en traces est encore à réaliser, le test d'*Aspergillus niger* utilisé il y a une quarantaine d'années s'étant avéré décevant (tableau IV). Le grand nombre de recherches réalisées au cours de la dernière décennie pour mesurer en milieu contrôlé et par des techniques très simplifiées la biodisponibilité d'éléments en traces incorporés au sol (LINERES et JUSTE, 1980) via diverses matières fertilisantes organiques devrait pourtant faciliter la mise au point d'un test biologique prédictif dont l'emploi pourrait donner lieu à une certaine généralisation.

Bore	20
Cuivre	3 - 5
Fer	20
Manganèse	20
Molybdène	0,07 - 0,10
Zinc	15
Cobalt*	0,05
Sélinium*	0,1
Vanadium	0,002

Tableau III : Seuils de carence en éléments traces dans les végétaux (ppm/matière séche) (COPPENET et JUSTE, 1979).
Critical deficiency levels of trace elements in plants.

* Seuils en-deça desquels il y a risque de carence chez les ruminants consommant le végétal.

Il serait possible, par exemple, d'adopter une démarche analogue à celle suivie pour évaluer la mobilité potentielle d'un élément grâce à l'utilisation de réactifs chimiques. La quantité totale d'un élément prélevée par une culture-test en conditions rigoureusement standardisées est en effet à même de permettre une expression de sa *biodisponibilité globale ou absolue*, que l'on pourrait ramener à l'unité de poids

de sol. La notion de *biodisponibilité relative,* quantifiée par le rapport de la quantité totale d'un élément donné prélevée par la culture-test à la quantité totale présente dans le sol ou ajoutée à celui-ci, peut être intéressante à faire intervenir pour classer les milieux de culture ou les matières fertilisantes en fonction de leur aptitude à céder à la plante le dit élément.

Réactif	Zn extrait par réactif / Zn extrait par maïs
Fusion alcaline	763
Aspergillus niger	396
HCl 0,1 N	172
Acétate NH_4 + Dithizone	33
$MgSO_4$ 0,2 M	4
Maïs	1

Tableau IV :

Efficacité de différents réactifs d'extraction du zinc (VIETS F.G. Jr., 1967).

Efficiency of various procedures available to assess soil zinc bioavailability.

En fait, comme indiqué précédemment, la prévision de biodisponibilité des éléments du sol, et notamment des éléments en traces, est encore à ce jour essentiellement réalisée en faisant appel à des *techniques d'évaluation* de leur mobilité. L'effort des agronomes a toujours été axé sur la recherche de réactifs qui permettent de déboucher sur la meilleure *corrélation* entre quantité d'élément extraite par ces réactifs et celle extraite par le végétal ; en fait, on se contente le plus souvent d'établir des régressions entre concentrations de l'élément dans les réactifs chimiques et le végétal, ou encore, d'une manière plus opérationnelle, d'évaluer par divers réactifs les potentialités de mobilité dans les situations où des carences ou des toxicités de l'élément ont été identifiées avec certitude.

IV. LIMITES DE VALIDITE DES TECHNIQUES DE PREDICTION DE LA BIODISPONIBILITE QUI FONT APPEL A DES REACTIFS CHIMIQUES

Les corrélations entre mobilité mesurée par un réactif chimique et disponibilité pour le végétal ont été établies dans la majorité des cas pour un cultivar ou un environnement racinaire uniques. Or, certains facteurs du milieu ou des caractéristiques du végétal peuvent modifier fortement la biodisponibilité d'un élément sans que la mobilité de ce dernier estimée par un réactif chimique soit affectée.

1. Température du milieu racinaire

Elle joue un rôle important, voire déterminant, dans le transfert de certains éléments en traces entre le sol et la rhizosphère : il est bien établi, par exemple, que la carence en zinc sur maïs se manifeste surtout les années à printemps froids, même dans les sols où l'analyse a permis de conclure à une biodisponibilité acceptable de ce métal. L'influence de la température est variable selon les espèces métalliques considérées dont l'absorption peut relever de différents processus (tableau V). Cette observation conduit à considérer qu'en toute rigueur les seuils de carence ou de toxicité métalliques établis pour un végétal donné et des conditions climatiques bien définies ne sont sans doute pas transposables à des sols soumis à un environnement climatique très différent.

Température du sol	Cd
(° C)	(ppm M.S.)
15,5	5,6
21,1	6,9
26,2	7,9
32,2	9,8

Tableau V :

Température du sol et biodisponibilité de Cd pour le soja (HAGHIRI, 1974).

Effect of soil temperature on the Soybean Cd uptake.

Association Française pour l'Etude du Sol - www.afes.fr - 2010

2. Les interactions entre éléments

L'absorption d'un élément donné est la plupart du temps dépendante de la présence d'autres éléments au voisinage des racines ; cette dépendance s'exprime surtout en termes de compétition : les effets dépressifs exercés par les phosphates sur l'absorption du zinc ou d'autres métaux, par le sulfate sur celle du molybdène (tableau VI), par le manganèse sur celle du fer sont parmi les plus anciennement connus, mais il existe dans la littérature un nombre impressionnant d'autres exemples d'effets antagonistes, notamment parmi les éléments en traces métalliques.

Tableau VI : Interaction soufre-molybdène chez la luzerne (JUSTE et al., 1971).

Effect of the interaction between sulphur and molybdenum on the dry matter yield of lucerne.

Application au sol (à l'hectare)	Matière sèche Mo (ppm)	Matière sèche S (p. mille)
Pas d'application	0,22	2,9
Molybdène (200 g)	5,93	2,1
Soufre (200 kg)	0,12	9,3
Soufre + molybdène (200 kg + 200 g)	0,62	4,4

Les effets dépressifs exercés sur l'absorption d'un élément métallique peuvent, dans certains cas, s'expliquer par la formation de composés insolubles dans la rhizosphère ou à la surface de parois cellulaires où les concentrations en ions phosphates sont particulièrement élevées ; le plus souvent, il s'agit d'une véritable compétition biologique pour des sites d'absorption ou des transporteurs transmembranaires, mais les mécanismes précis de cette compétition (ou d'un phénomène interprété comme tel) sont encore loin d'être connus pour la totalité des éléments en traces susceptibles d'inter-agir. Quoi qu'il en soit, il est clair que les réactifs d'extraction utilisés pour apprécier la mobilité potentielle ne peuvent rendre compte de telles interactions qui souvent orientent profondément le transfert des éléments entre sol et végétal.

3. L'activité biologique au niveau de la rhizosphère

L'espace rhizosphérique est le siège d'une activité biologique importante due à la production d'exsudats racinaires solubles et insolubles. Ces derniers peuvent contracter avec les éléments en traces des liaisons susceptibles de modifier profondément leur mobilité (MENCH, 1985 ; MOREL, 1985). Ces exsudats, dont la majorité est très biodégradable, provoquent en outre le développement rapide d'une flore microbienne active qui peut soit entrer en compétition avec le végétal pour l'absorption de certains éléments, soit, au contraire, favoriser l'absorption de ces derniers par la production de ligands organiques qui maintiennent les métaux en solution (sidérophores).

Il est bien évident que ces processus, qui n'intéressent qu'un très faible volume de sol et n'interviennent que durant une partie de la vie du végétal, sont impossibles à mettre en évidence « a priori » par les réactifs agronomiques usuels.

4. L'interception racinaire

Dans le cas particulier des éléments en traces métalliques, l'interception racinaire peut prendre une certaine importance en raison de la rétention énergique de la plupart d'entre eux par la phase solide du sol et donc de la contribution modérée de la diffusion et du mass-flow à l'alimentation du végétal. La colonisation rapide du sol par le chevelu racinaire compense dans une certaine mesure la faible mobilité générale des éléments en traces. La possibilité pour les racines d'exploiter des volumes de sol où la répartition de ces éléments est très variable (en fonction de

Association Française pour l'Etude du Sol - www.afes.fr - 2010

la profondeur notamment) peut conduire à donner une image également variable de leur biodisponibilité : par exemple (figure 3), un végétal donné peut accumuler des quantités très différentes de cadmium selon qu'il est cultivé en plein champ ou en petits vases de végétation contenant le même sol ; en effet, dans ce dernier cas, le confinement du système racinaire dans un volume imposé interdit toute colonisation des horizons sous-jacents moins riches en métal, comme cela se produit en plein champ.

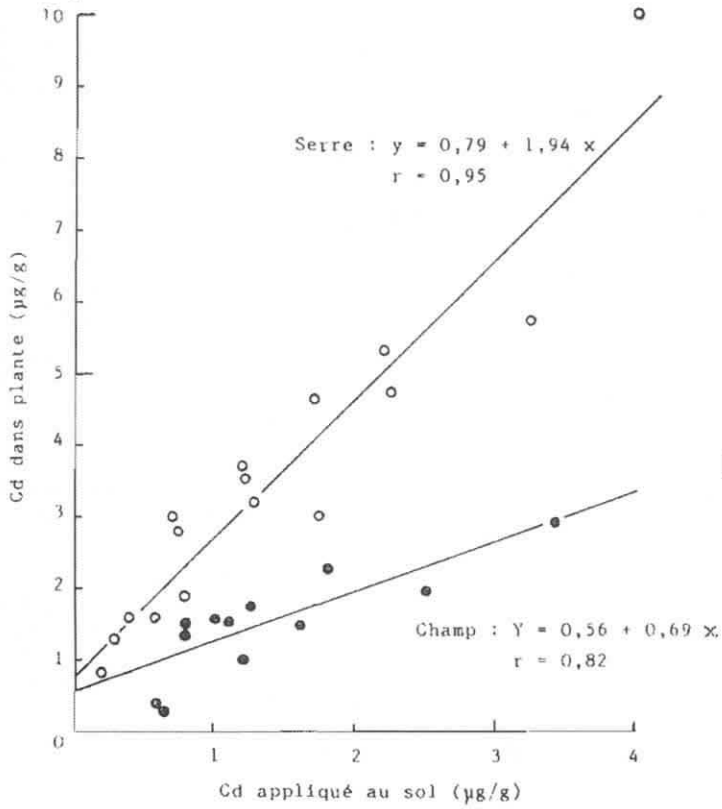

Figure 3 :

Accumulation de Cd dans la betterave cultivée sur un même sol au champ ou en serre, en petits vases de végétation.

(PAGE et CHANG, 1978)

Cadmium uptake by sugar beet growing in the same soil in field or in greenhouse pot experiment.

5. Espèces et variétés

Il est connu que des espèces différentes ou des variétés d'une même espèce qui se développent conjointement sur un même sol n'absorbent pas de manière identique un élément donné (tableau VII), et cela en raison de différences de comportement au niveau de l'absorption, du transfert dans le végétal ou de l'ensemble de ces deux phénomènes. Le concept de biodisponibilité tel qu'il a été précédemment défini devrait donc en toute logique concerner un couple « élément en traces - végétal » bien précis et non pas seulement l'élément. Il est non moins clair cependant qu'une telle restriction équivaudrait à priver ce concept de toute retombée opérationnelle digne d'intérêt.

Tableau VII : Teneurs en éléments-traces (ppm/MS) - Influence de l'espèce (KABATA-PENDIAS, PENDIAS, 1984).

Variation in trace element content among various plants from one site in the same ecosystem.

	Agrostis alba (graminée)	Trifolium pratense (trèfle)	Entodon schreberi (mousse)
B	3,4	9,0	3,2
Cu	4,2	6,0	10,3
Fe	80,0	115,0	425,0
Mn	740,0	136,0	180,0
Zn	59,0	99,0	77,0
Cd	0,6	0,7	0,7
Pb	1,2	2,8	13,0
Ni	1,8	2,2	1,6

Association Française pour l'Etude du Sol - www.afes.fr - 2010

V. CONCLUSION

L'assimilation du concept de biodisponibilité à celui de mobilité physico-chimique, la non-distinction entre notion de flux et celle de stock font partie du nombre des hypothèses simplificatrices auxquelles a souvent recours l'agronome.

Pour ce qui concerne les éléments majeurs, l'expérience a largement démontré l'intérêt de cette simplification puisque, malgré certaines imperfections, la prévision de la mobilité donne une image acceptable de la biodisponibilité réelle d'un élément, ce qui explique en partie la faveur rencontrée par l'analyse de terre.

Le résultat est dans l'ensemble moins satisfaisant pour beaucoup d'éléments en traces et cela principalement en raison de la diversité de leur nature à l'origine de comportements physico-chimiques ou biologiques très variés, dont peut rendre difficilement compte un nombre limité de réactifs. Par ailleurs, par comparaison aux éléments majeurs, on dispose de moins de recul et d'un nombre moins grand de situations bien tranchées (zones à carences ou à toxicités) permettant un étalonnage des relations liant la mobilité à la biodisponibilité.

Des progrès substantiels en matière de prédiction de la biodisponibilité des éléments en traces exigent la poursuite de l'effort de recherche dans les directions suivantes :

— prise en compte plus systématique du diagnostic végétal, la plante représentant le réactif d'extraction qui traduit le mieux la biodisponibilité réelle et intègre tous les facteurs qui la déterminent ;
— mise au point de réactifs chimiques « doux » permettant d'accéder à la fraction de l'élément la moins fortement liée et donc assez proche de celle que peut mobiliser la culture. Les progrès considérables réalisés au plan instrumental (absorption atomique sans flamme, polarographie, redissolution anodique) dans la détection de concentrations extrêmement faibles devraient faciliter cette tâche ;
— approfondissement de l'étude des paramètres qui interviennent dans l'absorption des éléments en traces, sans modifier leur mobilité, et ceci en vue de déboucher sur une modélisation satisfaisante, et donc traductible au plan opérationnel, de la biodisponibilité.

Reçu pour publication : Mars 1988
Accepté pour publication : Mai 1988

ASSESSMENT OF TRACE ELEMENT MOBILITY AND BIOAVAILABILITY IN SOIL

The main purpose of this paper is to call the attention of soil scientists on the difference existing between the concept of trace element mobility and the concept of their bioavailability (fig. 1).

The reasons prevailing in the choice of various chemical extracting solutions (fig. 2 and table 1) are discussed.

The amounts of extracted trace elements should be enough important to allow for analysis requirements but this amount should be also in the magnitude of plant uptake ability.

The validity of other methods available to predict trace element mobility as sequential extraction procedure, solubilization by mineral acid or increasing strenght or computer modeling (table 2), is also examined.

Extraction by a growing plant (table 4) is the more adequate procedure to evaluate with accuracy the trace element bioavailability, that involving critical levels of toxicity or deficiency assessment (table 3).

The approach considering as identical both trace element mobility and bioavailability is limited by the multicomponent nature of the soil-plant system as : root-temperature (table 5), competition between mineral nutrients (table 6), rhizospheric interactions, soil root colonization (fig. 3) and, above all, the large variation in trace element uptake ability among plant species or cultivars (table 7).

Association Française pour l'Etude du Sol - www.afes.fr - 2010

BIBLIOGRAPHIE

COPPENET M., JUSTE C., 1979. — Oligo-éléments indispensables à la vie des plantes. Phénomènes de toxicité. In : *Pédologie - 2. Constituants et propriétés du sol* (BONNEAU M., SOUCHIER B., eds), Masson, Paris, pp. 408-415.

DHAESE A., COTTENIE A., 1979. — Contents of heavy metals in sludges and their environmental significance. In : Proc. First Europ. Symp. *« Treatment and use of sewage sludge »* (ALEXANDRE D., OTT H., eds), *Commission of the European Communities*, Brussels (BEL), pp. 364-371.

GRAMBELL R.P., PATRICK W.H., LANDES S.L., REDDY C.N., 1982. — Soil physico-chemical parameters affecting metal availability in sludge-amended soils. *E.P.A. Cincinnati, Ohio 45268, Grant N° R 805789*, 100 p.

GUILLET B., JEANROY E., ROUGIER C., SOUCHIER B., 1980. — Le cycle biogéochimique et la dynamique du comportement des éléments-traces (Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cr) dans les pédogenèses organiques acides. Rapport ATP « Formation et distribution des gisements ». *Note technique et Sci. du Centre de Pédologie, Nancy*, n° 27, 49 p.

HAGHIRI F., 1974. — Plant uptake of cadmium as influenced by cation exchange capacity, organic matter, zinc and soil temperature. *J. Environ. Qual. 3*, 182-188.

JUSTE C., DELAS., J TAUZIN J., 1971. — Carence en soufre de la luzerne en sol de Charente. III. Interaction soufre-molybdène dans un essai réalisé en vases de végétation. *C.R. Acad. Agric. Fr., 57*, 1134-1139.

JUSTE C., 1983. — Problèmes posés par l'évaluation de la disponibilité pour la plante des éléments-traces du sol et de certains amendements organiques. *Sci. Sol, n° 2*, 109-122.

KABATA-PENDIAS A., PENDIAS H., 1984. — Trace elements in soils and plants. *C.R.C. Press, Boca-Raton*, Florida, 33431, 315 p.

LAMY I., 1986. — Complexation dans les systèmes organo-minéraux modèles et naturels. Etude comparative des interactions cuivre (II) - ligand (s) monomères (s) et cuivre (II) - polymères. *Thèse Dr Univ. Cl.-Bernard, Lyon I*, n° 9386, 180 p.

LINERES M., JUSTE C., 1980. — Mise au point de tests agronomiques permettant d'apprécier simultanément la phytotoxicité globale de boues de station d'épuration et la disponibilité pour les plantes des métaux qu'elles contiennent. *Conv. Et. MECV-INRA, n° 77-145*, 45 p.

LUND L.J., SPOSITO G., PAGE A.L., 1985. — Determination and prediction of chemical forms of trace metals in sewage sludge-amended soils. *U.S.-E.P.A., Cincinnati, Project Summary 600 1Sr-85-/053.*

MEGUELLATTI N., 1982. — Mise au point d'un schéma d'extractions sélectives des polluants métalliques associés aux diverses phases constitutives des sédiments. *Thèse Dr en chimie, I.U.R.S., Univ. Pau*, 106 p.

MENCH M., 1985. — Influence des exsudats racinaires solubles sur la dynamique des métaux dans la rhizosphère du maïs. *Thèse Dr I.N.P.L., Univ. Nancy*, 110 p.

MOREL J.L., 1985. — Contribution à l'étude des transferts de métaux lourds dans le système sol-plante : le rôle des mucilages racinaires. *Thèse Dr ès Sci., I.N.P.L., Univ. Nancy*, 176 p.

NIEBOER E., RICHARDSON D.H.S., 1980. — The replacement of the nondescript term « heavy metals » by a biologically and chemically significant classification of metal ions. *Environ. Poll. (series B), 1*, 3-26.

PAGE A.L., CHANG A.C., 1978. — Trace elements impact on plants during cropland disposal of sewage sludges. In : *Proc. Fifth Nat. Conf. on Acceptable Sludge Disposal Techniques. Information Transfert Inc.*, Rockville, Maryland, 91-96.

SPOSITO G., BINGHAM F.T., 1981. — Computer modeling of trace metal speciation in soil solutions : correlation with trace metal uptake by higher plants. *J. Pl. Nutr., 3*, 35-49.

TROCME S., 1970. — Influence de la fertilisation et de diverses techniques de culture sur l'alimentation des plantes en oligo-éléments. *Ann. Agron., 21*, 519-548.

VIETS F.G., 1967. — Soil testing for micronutrients. In : Soil Testing and Plant Analysis, Ed. *Soil Sci. Soc. Amer. Inc.*, Madison, 55-69.

Association Française pour l'Etude du Sol - www.afes.fr - 2010